



Validation of the Recent Development of the Displacement Method

geogrid reinforced wall

Lemonnier, P.; Soubra, A. H.

Publication date:
1997

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Lemonnier, P., & Soubra, A. H. (1997). *Validation of the Recent Development of the Displacement Method: geogrid reinforced wall*. Geotechnical Engineering Group. AAU Geotechnical Engineering Papers: Soil Mechanics Paper Vol. R 9712 No. 16

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Validation of the recent development of the displacement method - geogrid reinforced wall

P. Lemonnier, A.H. Soubra

1997

Soil Mechanics Paper No 16



**GEOTECHNICAL ENGINEERING GROUP
AALBORG UNIVERSITY DENMARK**

Lemonnier, P., Soubra, A.H. (1997). Validation of the recent development of the displacement method - geogrid reinforced wall.

AAU Geotechnical Engineering Papers, ISSN 1398-6465 R9712.

Soil Mechanics Paper No 16

The paper has been published in *Colloquy EC97 on the comparison between experimental and numerical results*. Strasbourg, France. Vol 1, pp. 95-102.

© 1997 AAU Geotechnical Engineering Group.

Except for fair copying, no part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the Geotechnical Engineering Group.

Papers or other contributions in AAU Geotechnical Engineering Papers and the statements made or opinions expressed therein are published on the understanding that the author of the contribution is solely responsible for the opinions expressed in it and that its publication does not necessarily imply that such statements or opinions are or reflect the views of the AAU Geotechnical Engineering Group.

The AAU Geotechnical Engineering Papers - AGEp - are issued for early dissemination and book keeping of research results from the Geotechnical Engineering Group at Aalborg University (Department of Civil Engineering). Moreover, the papers accommodate proliferation and documentation of field and laboratory test series not directly suited for publication in journals or proceedings.

The papers are numbered ISSN 1398-6465 R<two digit year code><two digit consecutive number>. For internal purposes the papers are, further, submitted with coloured covers in the following series:

Series	Colour
Laboratory testing papers	sand
Field testing papers	grey
Manuals & guides	red
Soil Mechanics papers	blue
Foundation Engineering papers	green
Engineering Geology papers	yellow
Environmental Engineering papers	brown

In general the AGEp papers are submitted to journals, conferences or scientific meetings and hence, whenever possible, reference should be given to the final publication (journal, proceeding etc.) and not to the AGEp paper.

Validation du récent développement de la méthode en déplacement - Mur renforcé par géogrilles

P. Lemonnier* & A.H. Soubra**

* Université d'Aalborg, Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg, Danmark

** LERGECE, ENSAIS, 24 Bd de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex

Résumé : Un développement de la "méthode en déplacement" (Gourc et al, 1986) a été récemment proposé (Lemonnier, 1995) pour l'analyse de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. Il est basé sur une double application de l'approche variationnelle couplée au concept de la membrane ancrée. Un mur expérimental (Bathurst et al, 1988), de 3m de hauteur, a été analysé par le présent modèle en vue de le valider. Une comparaison avec les résultats obtenus par la "méthode en déplacement" originale est également présentée et commentée. La prédiction théorique du comportement de l'ouvrage renforcé, en termes de tensions de renfort, s'est révélée améliorée par le présent modèle.

Abstract : A development of the "displacement method" (Gourc et al, 1986) has been recently proposed (Lemonnier, 1995) for the geosynthetically reinforced slopes stability analysis. It is based on a double application of the variational approach coupled with the anchored membrane concept. An experimental 3m high wall (Bathurst et al, 1988), has been analysed by the present model in order to validate it. A comparison with the results obtained with the original "displacement method" is also presented and discussed. The theoretical prediction of the behaviour of the reinforced structure, in terms of reinforcement tensions, is improved by the present model.

1. Introduction

La majorité des méthodes permettant le dimensionnement des ouvrages en terre renforcés par des nappes géosynthétiques sont basées sur de nombreuses hypothèses simplificatrices. Ces dernières concernent d'une part la forme de la ligne de glissement et la distribution des contraintes normales le long de cette ligne, et d'autre part la détermination des tensions dans les renforts. Dans le but de diminuer le nombre de ces hypothèses, un développement de la "méthode en déplacement" de Gourc et al (1986) a été récemment proposé (Lemonnier, 1995). Ce développement est basé sur une double application de l'approche variationnelle couplée au concept de la membrane ancrée. On la nommera dans la suite la "méthode en déplacement variationnelle".

Cet article se propose d'une part de rappeler brièvement les principes de base de ce nouveau développement, et d'autre part, de montrer la validation de cette méthode en l'appliquant à un modèle expérimental à grande échelle, et en la comparant avec la "méthode en déplacement" originale. Pour cela, les tensions

dans les renforts ainsi que la surface de rupture, obtenus par la présente méthode, sont comparés à ceux obtenus expérimentalement, ainsi que ceux obtenus par la "méthode en déplacement" originale.

2. Méthode en déplacement variationnelle

D'une part, en appliquant la méthode du prisme de rupture variationnelle, mise au point par Baker et Garber (1977) dans le cas des talus non renforcés, au cas des talus renforcés, on a montré que la trace de la surface de rupture est une spirale logarithmique (voir fig. 1). La seule équation d'équilibre des moments de tous les efforts agissant sur la masse en glissement suffit à déterminer le facteur de sécurité F_s , défini vis à vis des caractéristiques de cisaillement du sol.

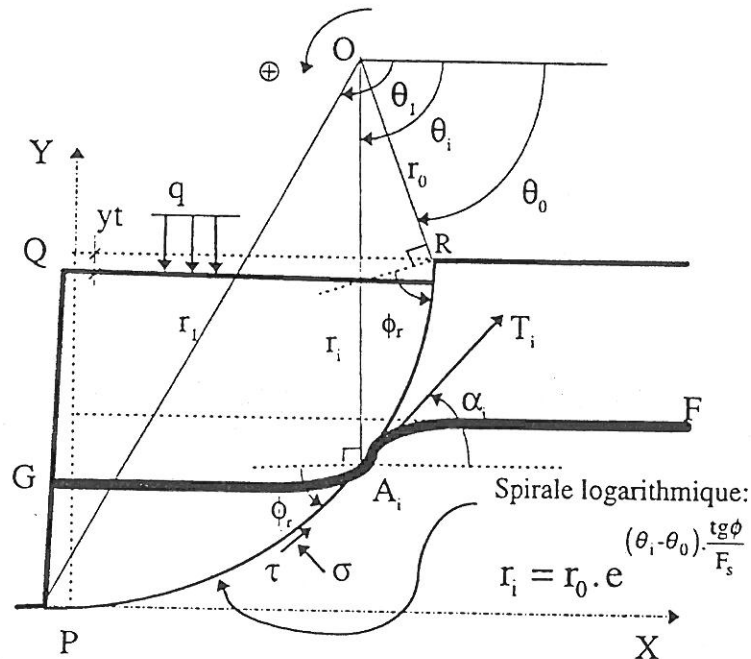


Fig. 1: Stabilité globale du talus renforcé. Surface de rupture extrême
Fig. 1: Global stability of the reinforced slope. Extremal failure surface

D'autre part, en vue d'évaluer la contribution des renforts sur la stabilité, le calcul variationnel a été appliqué à l'équilibre de la membrane au voisinage de la ligne de glissement, couplé au principe de la méthode en déplacement et du concept de la membrane ancrée (Gourc et al, 1986). Ainsi, on définit un champ de déplacement le long de la surface de rupture caractérisé par un déplacement en tête y_t , qui permet la mobilisation des nappes (voir fig. 1). L'approche variationnelle permet de déterminer la forme optimale (spirale logarithmique, voir fig. 2) ainsi que la position optimale de la nappe pour lesquelles on obtient la tension extrême au niveau de l'intersection nappe - surface de rupture. Tout comme pour l'équilibre global, on a montré que la seule équation d'équilibre des moments par rapport au foyer C de la spirale logarithmique permet d'obtenir une relation entre la tension de renfort T_A et la tension T_{B1} au point B_1 . Cette dernière est ensuite obtenue en considérant, pour chaque nappe, l'équilibre local couplé

avec les lois de comportement en traction de la nappe et de celui en friction de l'interface sol-nappe (voir fig. 3).

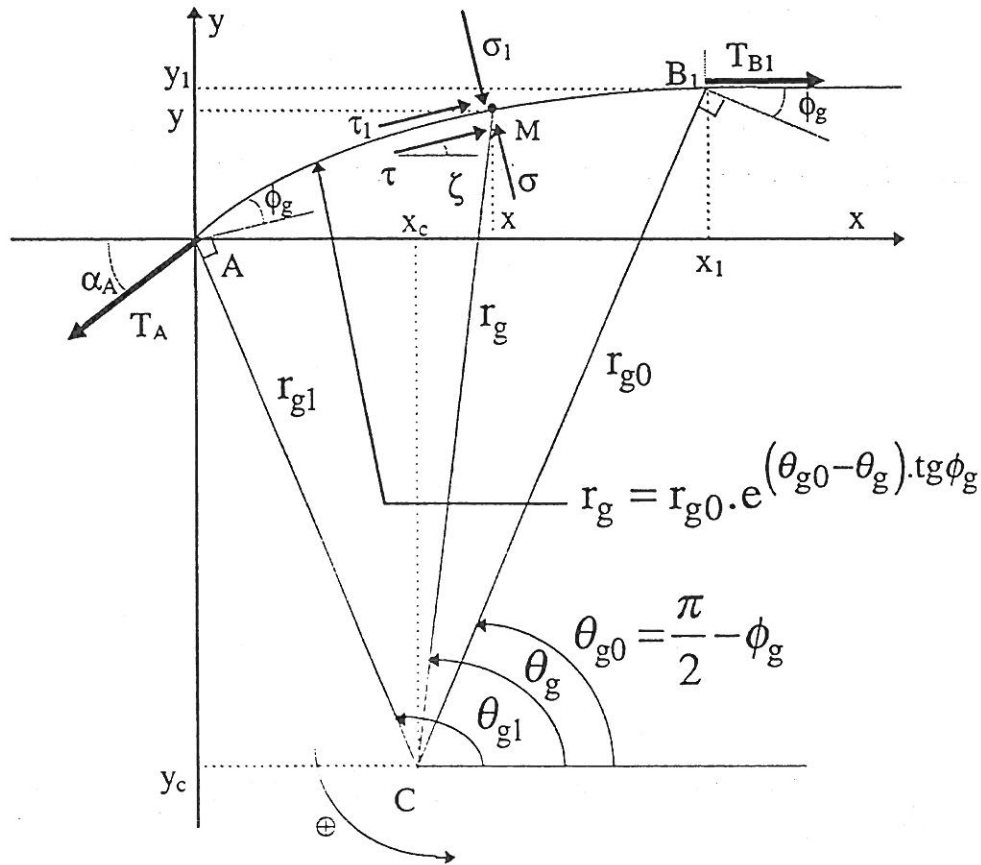


Fig. 2 : Forme de la membrane amont résultant de l'analyse variationnelle
Fig. 2 : Shape of the upstream membrane from the variational analysis

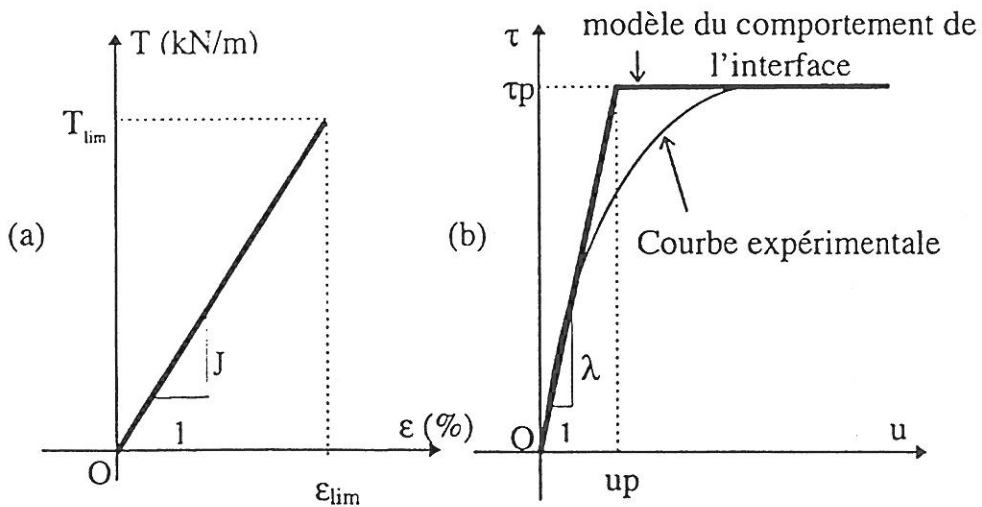


Fig. 3: Comportement (a) en traction et (b) en friction de l'inclusion -
(Gourc et al, 1986)

Fig. 3: (a) Tensile and (b) friction behaviour of the inclusion -
(Gourc et al, 1986)

En outre, on obtient la répartition des tensions et des déplacements relatifs sol-nappe le long des nappes. Cette modélisation est basée sur des hypothèses arbitraires sur la répartition des contraintes agissant sur la face supérieure de la membrane amont représentée sur la figure 2. Cependant, les résultats numériques apparaissent très peu sensibles à ces hypothèses (voir Lemonnier, 1995 et Lemonnier et al, 1995).

3. Validation de la méthode

3.1. Présentation de l'ouvrage expérimental

Ce modèle expérimental (voir Fig. 4), de 3m de hauteur, 2.45m de large, 6.1m de long et constitué d'un sol pulvérulent d'angle de frottement interne 53° , fût construit et testé dans le cadre d'un projet de recherche au Royal Military College (RMC) du Canada (Bathurst et al, 1988). Il fut renforcé par quatre nappes de géogrilles en polyéthylène haute densité (HDPE) possédant une tension ultime obtenue par l'essai de traction sur grande largeur (ASTM D 4595) de 12.26kN/m correspondant à une déformation de 14% dans la direction où elles étaient orientées. Ce modèle fût chargé en crête par incréments de surcharges jusqu'à la rupture (50kN/m).

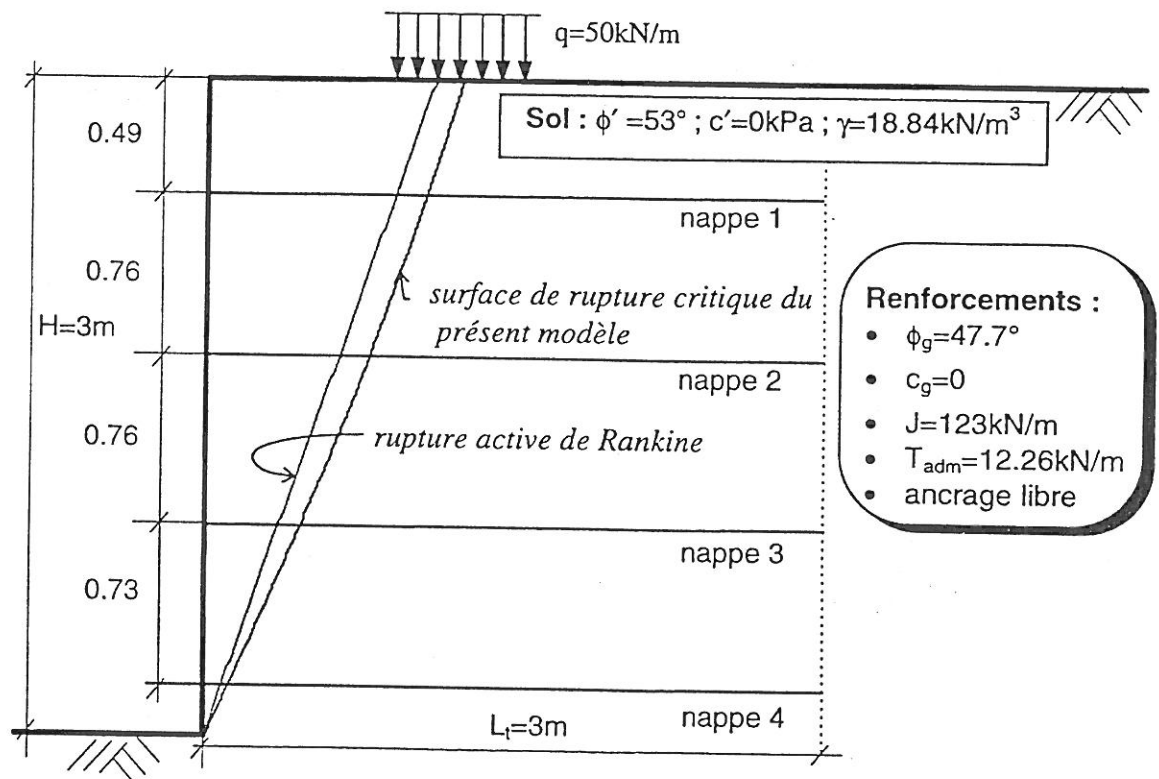


Fig. 4: Configuration du mur RMC (d'après Claybourn, 1990). Surfaces de rupture théoriques

Fig. 4: RMC model wall configuration (after Claybourn, 1990), and theoretical failure surfaces

3.2. Présentation de l'étude comparative

Dans cette section, les résultats obtenus par la présente méthode sont comparés à ceux obtenus expérimentalement (voir fig. 5) rapportés par Bathurst et al (1988), ainsi qu'à ceux obtenus par la "méthode en déplacement" originale (Gourc et al, 1986). Cette méthode (logiciel "Cartage") permet la détermination du facteur de sécurité pour une ligne de glissement donnée (pas de recherche automatique de la surface critique). Les résultats de "Cartage" présentés sur les figures 5 et 6 concernent la surface de rupture critique déterminée par le présent modèle. De plus, les trois modélisations simplifiées de la membrane proposées par "Cartage" ont été considérées ici :

- $idefo=1$: schématisation du comportement du géosynthétique en "petits déplacements" et T_i horizontale (voir fig. 1);
- $idefo=2$: "petits déplacements" et T_i tangent à la surface de rupture;
- $idefo=3$: "grands déplacements" et T_i horizontale.

Les résultats théoriques du présent modèle correspondent à une certaine valeur du déplacement vertical en tête ($y_t=19.7\text{mm}$) pour laquelle la valeur minimale du facteur de sécurité est égale à 1, en considérant une spirale logarithmique comme surface de rupture (voir §2).

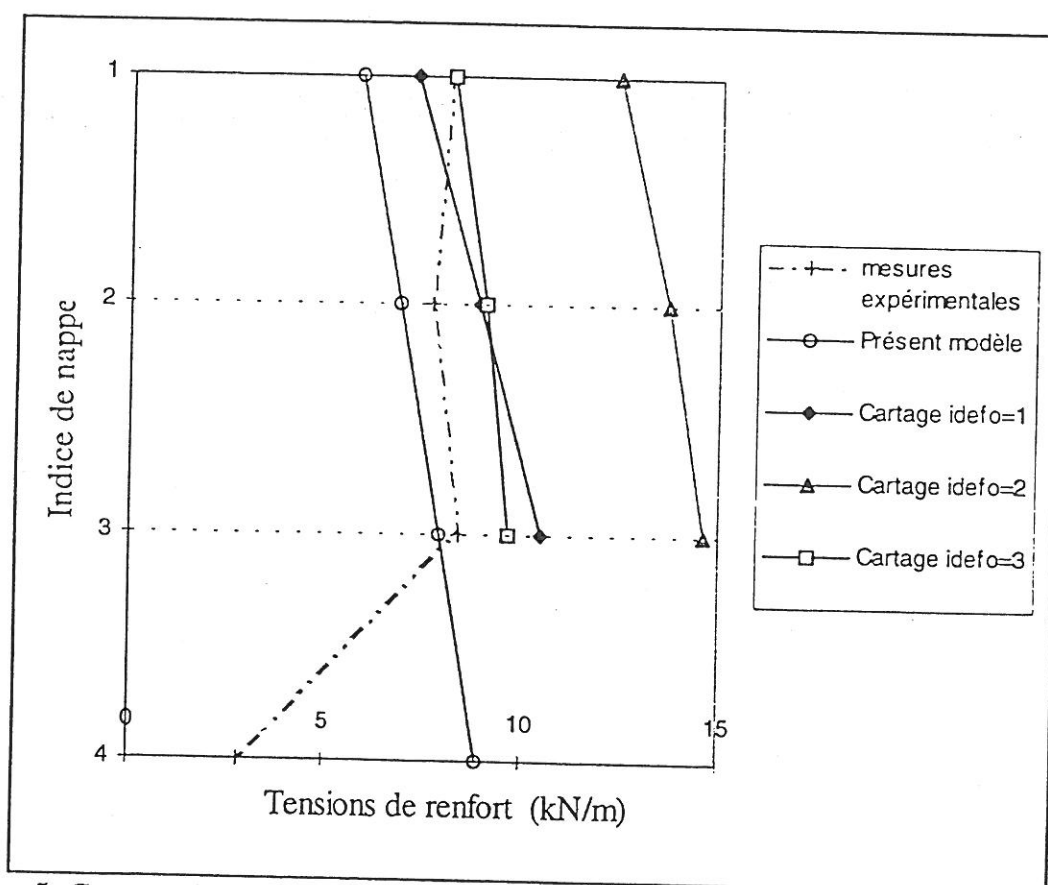


Fig. 5: Comparaison des tensions de renfort expérience/théorie pour le mur RMC
 Fig. 5: Comparison between experience and theory of the reinforced tensions for RMC wall configuration

En ce qui concerne les résultats de "Cartage", nous avons recherché, pour la surface de rupture obtenue par le présent modèle, la valeur du déplacement vertical en tête qui aboutit également à un facteur de sécurité égal à l'unité. Nous avons obtenus les déplacements suivants :

- $idefo=1$: $y_t=60\text{mm}$
- $idefo=2$: $y_t=31.2\text{mm}$
- $idefo=3$: $y_t=20.7\text{mm}$

Notons, que le présent modèle donne un déplacement relativement proche de celui obtenu par la deuxième modélisation de "Cartage".

De plus, le déplacement relatif sol/géosynthétique u_p correspondant au palier du comportement en friction de l'interface (voir Fig. 3b), et qui intervient dans le présent modèle, n'est pas disponible dans le rapport concernant le mur RMC. Nous avons donc dû choisir la valeur la plus réaliste possible ($u_p=2.5\text{ cm}$) compte tenu des matériaux en présence et de différentes études expérimentales sur la détermination de ce paramètre (Ratel, 1987 et Gotteland, 1991). Notons toutefois, que l'influence de ce paramètre sur la détermination de la tension de renfort est négligeable (Ratel, 1987).

Les résultats présentés à la figure (5) montrent que, mise à part la nappe la plus basse, les intensités des tensions de renfort mesurées sont relativement bien prédites par "Cartage" $idefo=1$ et 3, et par notre modèle. Les écarts, entre les tensions expérimentales et celles du présent modèle, varient de 39% (pour la nappe 1) à 6% (pour la nappe 3). Concernant la nappe la plus basse, pour laquelle "Cartage" ne donne aucun résultat, il est à noter que Bathurst et al (1988) ont indiqué dans leur rapport que la faible tension obtenue a dû être influencée par la mise en œuvre du modèle expérimental. Pour la nappe 1, "Cartage" $idefo=1$ et 3 donnent la meilleure prédiction, tandis que pour les nappes 2 et 3, c'est le présent modèle qui est le meilleur. Remarquons que seul le présent modèle donne les trois tensions inférieures à celles mesurées, ce qui est dans le sens de la sécurité.

Notons également que les modélisations de la membrane dans lesquelles les tensions de renfort sont considérées agir horizontalement ($idefo=1$ et 3) donnent pratiquement les mêmes résultats. Quant à la modélisation autorisant une inclinaison des tensions de renfort ($idefo=2$), elle donne des tensions très supérieures à celles mesurées.

En ce qui concerne les inclinaisons des tensions de renfort, les valeurs obtenues par le présent modèle sont présentées à la figure 6, dans laquelle sont également indiquées les inclinaisons α_{Amax} de la surface de rupture au niveau de chaque nappe (qui correspondent également aux résultats de "Cartage" $idefo=2$).

Puisque l'inclinaison de la membrane au niveau de la surface de rupture n'a pas été mesurée dans ce projet, aucune comparaison ne peut être effectuée avec des valeurs expérimentales. Cependant, on peut remarquer que les valeurs obtenues par notre modèle montrent que l'inclinaison de la tension de renfort tend à augmenter avec la profondeur d'enterrement de la nappe, et qu'elle est nettement inférieure à celle extrême du plan de rupture, qui elle décroît avec la profondeur d'enterrement.

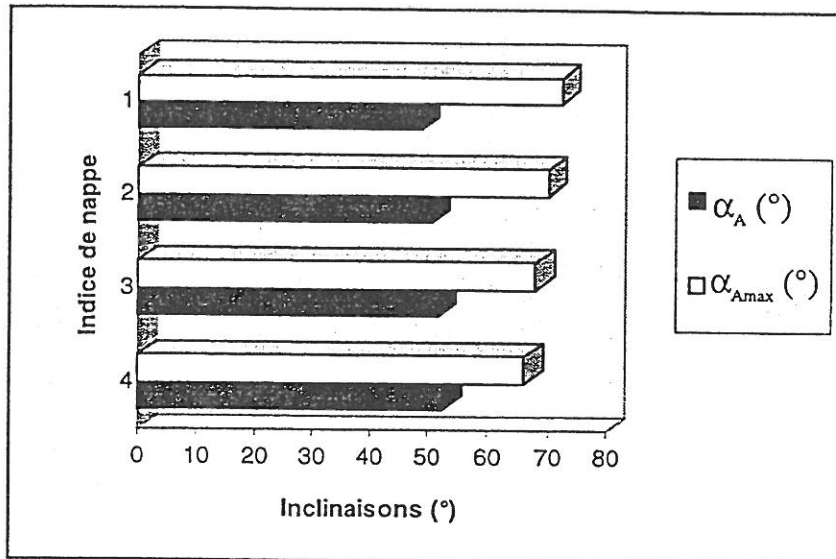


Fig. 6: Inclinaisons théoriques des tensions de renfort
Fig. 6: Theoretical inclinations of the reinforcement tensions

En ce qui concerne les surfaces de rupture (voir Fig. 4), le modèle théorique donne une spirale logarithmique qui est proche du plan de rupture décrit par la rupture active de Rankine. Ceci est en accord avec la rupture escarpée qui fût observée lors de l'essai.

4. Conclusion

Un développement de la "méthode en déplacement" de Gourc et al (1986) a récemment été proposé (Lemonnier, 1995) pour l'analyse de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. Il repose sur une double application de l'approche variationnelle d'une part à l'équilibre global du massif renforcé, et d'autre part à celui local au niveau de chaque nappe de renfort. Ainsi, le nombre d'hypothèses arbitraires couramment admises dans la plupart des méthodes de dimensionnement, a été sensiblement diminué dans la présente analyse.

Cet article présente une validation de ce récent développement en l'appliquant à un modèle expérimental effectué par Bathurst et al (1988) au Royal Military College du Canada.

On a ainsi montré que la présente méthode donne une bonne prédiction du comportement de l'ouvrage renforcé en termes d'intensité des tensions de renfort. De plus, la prédiction de la surface de rupture par le présent modèle s'est révélée satisfaisante.

Enfin, ces résultats théoriques et expérimentaux ont été comparés à ceux obtenus par la "méthode en déplacement" originale (Gourc et al, 1986, logiciel "Cartage"), en considérant les trois modélisations simplifiées de la membrane proposées par ces auteurs. Cela a permis de montrer l'amélioration de la méthode.

5. Bibliographie

- Baker, R. & Garber, M.** - Variational Approach to Slope Stability. *9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, 1977. Vol. 2, p. 9-12.
- Bathurst, R. J., Benjamin, D. J. & Jarrett, P. M.** - Laboratory study of Geogrid Reinforced Walls. *Royal military College of Canada, Kingston, Ontario. Proc. of the Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 18, R. D. Holtz, Ed., 1988, p. 178-192.
- Claybourn, A. F.** - A comparison of design methods for geosynthetic-reinforced earth walls. *M. Sc. thesis: Department of Civil Engineering, University of Colorado, Denver, USA*, 1990. 153 p.
- Gotteland, Ph.** - Renforcement des sols par géosynthétiques ; dimensionnement et validation. *Thèse de Doctorat : Université Grenoble I, France*, 1991. 384 p.
- Gourc, J. P., Ratel, A. & Delmas Ph.** - Design of fabric retaining walls : the Displacements Method. *Third Int. Conf. on Geotextiles and geomembranes, Vienna, Austria*, 1986, session 3A/1, p. 289-294.
- Lemonnier, P.** - Application de la méthode variationnelle au problème de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *PhD thesis. I.N.S.A Lyon, France*, 1995. 483 p.
- Lemonnier, P., A.H. Soubra & R. Kastner** - Étude de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *Communication GEO 1995, Aussois, France*, 1995. 3 p.
- Ratel, A.** - Modélisation d'un sol renforcé par géosynthétique : application de la « méthode en déplacements ». *Thèse : Doct. Ing. : Université Scientifique et Médicale et l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France*, 1987. 357 p.

AGEP: Soil Mechanics papers

- 6 Ibsen, L.B. (1995). Soil Parameters, Final proceedings MCS - Project MAST II, July 1995. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9514.
- 7 Sørensen, C. S., Ibsen, L. B. , Jakobsen, F. R., Hansen, A., Jakobsen, K. P., (1995) "Bearing Capacity of Caisson Breakwaters on Rubble Mounds". Proceedings of the Final Project Workshop, Monolithic (Vertical) Coastal Structures, Alderney, UK, Appendix IX, p 26. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9515.
- 8 Ibsen, L.B., Steenfelt, J.S. (1996). Terningapparatet - et middel til bedre jordforståelse (The true-triaxial-apparatus - a means to better understanding of soil behaviour; in Danish). *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 1, pp 111-122. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9603.
- 9 Thorsen, G., Thomsen, B., Thorsen, S. (1996). Tilsyneladende forbelastning af Eem jordarter (Apparent preconsolidation of Eemian soils; in Danish). *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 1, pp 147-152. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9607.
- 10 Thorsen, G. (1996). Oedometer tests - an aid in determination of the geological load history. *Bull. of the Geological Society of Denmark*, Vol. 43, pp. 41-50. Copenhagen 1996-07-14. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9608.
- 11 Ibsen, L.B., Jakobsen, K.P. (1997). Dynamic Bearing Capacity of Caisson Breakwaters Subjected to Impulsive Wave Loading. MAST III (PROVERBS Workshop, Las Palmas, Feb. 18-24-1997. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9701.
- 12 Lade, P.V., Ibsen, L.B. (1997). A study of the phase transformation and the characteristic lines of sand behaviour. *Proc. Int. Symp. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Nagoya, Oct. 1997, pp. 353-359. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9702.
- 13 Bødker, L., Steenfelt, J.S. (1997). Vurdering af lodrette flytningsamplituder for maskinfundament, Color Print, Vadum (Evaluation of displacement amplitudes for printing machine foundation; in Danish). *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9706.
- 14 Ibsen, L.B., Steenfelt, J.S. (1997). Vurdering af lodrette flytningsamplituder for maskinfundament Løkkensvejens kraftvarmeværk (Evaluation of displacement amplitudes for gas turbine machine foundation; in Danish). *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9707.
- 15 Steenfelt, J.S. (1997). National R&D Report : Denmark. *Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering R&D*, Delft 13-14 February 1997. pp 4. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9708.
- 16 Lemonnier, P. and Soubra, A. H. (1997). Validation of the recent development of the displacement method - geogrid reinforced wall. *Colloquy EC97 on the comparison between experimental and numerical results*, Strasbourg, France. Vol.1, pp. 95-102. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9712.

AGEP: Soil Mechanics papers

- 17 Lemonnier, P. & Soubra, A. H. (1997). Recent development of the displacement method for the design of geosynthetically reinforced slopes - Comparative case study. *Colloquy on geosynthetics, Rencontres97, CFG*, Reims, France, Vol. 2, pp. 28AF-31AF (10pp). Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9713.
- 18 Lemonnier, P., Soubra, A. H. & Kastner, R. (1997). Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis : I. Local stability. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (1998) pp 1-25. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9714.
- 19 Lemonnier, P., Soubra, A. H. & Kastner, R. (1997). Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis : II. Global stability. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (1998) pp 27-44. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9715.
- 20 Ibsen, L.B. (1998). Analysis of Horizontal Bearing Capacity of Caisson Breakwater. 2nd PROVERS Workshop, Naples, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9802.
- 21 Ibsen, L.B. (1998). Advanced Numerical Analysis of Caisson Breakwater. 2nd PROVERS Workshop, Naples, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9803.
- 22 Ibsen, L.B., Lade P.V. (1998). The Role of the Characteristic Line in Static Soil Behavior. *Proc. 4th International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soil and Rocks*. Gifu, Japan. Balkema 1998. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9804.
- 23 Ibsen, L.B., Lade, P.V. (1998). The Strength and Deformation Characteristics of Sand Beneath Vertical Breakwaters Subjected to Wave Loading. 2nd PROVERS Workshop, Naples, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9805.
- 24 Steenfelt, J.S., Ibsen, L.B. (1998). The geodynamic approach - problem or possibility? Key Note Lecture, *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 2, pp 14. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9809.
- 25 Lemonnier, P., Gotteland, Ph. and Soubra, A. H. (1998). Recent developments of the displacement method. *Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics. Atlanta, USA*, Vol 2, pp 507-510. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9814.
- 26 Praastrup, U., Jakobsen, K.P., Ibsen, L.B. (1998). On the choice of strain measures in geomechanics. 12th Young Geotechnical Engineers Conference, Tallin, Estonia. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9815.
- 27 Ibsen, L.B. (1998). The mechanism controlling static liquefaction and cyclic strength of sand. *Proc. Int. Workshop on Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*, Baltimore. A.A.Balkema, ISBN 9058090388, pp 29-39. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9816.